

«علمی پژوهشی»

روش‌های تعیین چقرمگی شکست دینامیکی سنگ با نگاهی خاص بر آزمون هاپکینسون

علی اصغر میرمحمدلو^۱، حسین معماریان^{۲*}، محمدمبین جعفری^۳، شادی زندیاوری^۴، زهرا شاه‌مراد^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ دانشگاه تهران، ایران

۲- استاد دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ایران memarian@ut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه تورنتو، کانادا

۴- دانشجوی کارشناسی مهندسی معدن دانشگاه تهران، ایران

(دریافت ۱۰ خرداد ۱۳۹۱، پذیرش ۲۰ اسفند ۱۳۹۱)

چکیده

همگام با توسعه سریع فعالیت‌های مهندسی، نیاز روزافزون جوامع به انجام انواع فعالیت‌های مهندسی سنگ نظیر حفاری، استخراج، انفجار و جداسازی مواد معدنی، سبب به کارگیری اصول و روش‌های مکانیک شکست دینامیکی سنگ شده است. در عملیات حفاری و برش سنگ‌ها، که اصولاً بر مبنای مکانیزم رشد ترک در توده‌های سنگی استوار است، خواص مکانیک شکست بخش مورد حفاری از جمله رفتار رشد ترک در شکست لایه‌ها و توده‌های مختلف سنگ‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. علاوه بر این معادن یکی از پرمخاطره‌ترین محیط‌های کاری می‌باشند. تقریباً در تمامی معادن از مواد منفجره برای شکستن سنگ و حفر فضاهای زیرزمینی استفاده می‌گردد؛ از این رو هر لحظه امکان سقوط و یا پرتاب سنگ به اطراف وجود دارد. با افزایش عمق حفاری‌ها، پدیده‌ی انفجار سنگ پیش می‌آید. با توجه به رفتار سنگ‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف و چگونگی شروع و گسترش شکست در سنگ‌ها می‌توان به انجام فعالیت‌های مهندسی فوق‌الذکر سرعت بخشیده و همچنین هزینه‌های اجرایی آنها را کاهش داد. بنابراین به‌منظور تأمین ایمنی در برابر نیروهای دینامیکی و دانستن نحوه‌ی صحیح شکستن سنگ‌ها، آگاهی از عوامل موثر در شکست آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله سعی بر این است شکست دینامیکی سنگ و پارامترهای موثر بر آن، آزمون‌های مورد استفاده برای تعیین پارامترهای شکست دینامیکی، روابط مورد نیاز برای محاسبه آن‌ها و تاثیر نرخ بارگذاری بر چقرمگی شکست دینامیکی ارائه شود. در ادامه برای تعیین چقرمگی شکست دینامیکی سنگ‌ها، آزمون‌هایی با دستگاه هاپکینسون انجام گرفته که نتایج آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی

چقرمگی شکست دینامیکی، آزمون‌های تعیین چقرمگی شکست، دستگاه میله هاپکینسون اصلاح شده، نرخ بارگذاری، شکست دینامیکی سنگ

۱- مقدمه

تحت عنوان استحکام ترک یا چقرمگی شکست^۱ نامیده می-شود. چقرمگی شکست، میزان مقاومت ماده در برابر رشد و جوانه زنی ترک است. خصوصیات شکست مواد، اغلب به منظور طراحی سازه‌ها و تخمین میزان تحمل آسیب و شکست آن‌ها مورد نیاز می‌باشند.

چقرمگی شکست دینامیکی برای آنالیز سازه‌های مهندسی که تحت بار دینامیکی هستند، امری حیاتی است. همچنین در موادی که به نرخ بارگذاری حساس هستند تعیین چقرمگی شکست دینامیکی ضرورت دارد. بنابراین فعالیت‌های مهندسی معدن و عمران توسعه روش‌های اندازه‌گیری چقرمگی شکست دینامیکی سنگ، بتن و دیگر مواد ترد ضروری است. از آن جایی که بعضی سازه‌ها ممکن است تحت بارگذاری دینامیکی قرار گیرند، رفتار آن‌ها باید در نرخ‌های کرنشی نزدیک به آن بارگذاری‌ها، اندازه‌گیری شود [۳].

چونان (۱۹۹۹) با استفاده از نمونه‌های تیرشکل مکعبی در دستگاه سقوط وزنه^۲ و ونگ (۲۰۰۸ و ۲۰۱۱) توسط نمونه‌های دیسک برزیلی مسطح سوراخ‌دار^۳ و برزیلی مسطح با شکاف مستقیم^۴ در دستگاه هاپکینسون چقرمگی شکست دینامیکی سنگ مرمر را تعیین کردند [۴-۶]. نیکیتا (۲۰۰۹) ضریب شدت تنش دینامیکی و استاتیکی چند نوع سنگ مختلف را مورد بررسی قرار داد [۷]. چن (۲۰۰۹) با نمونه‌های نیم‌دایره‌ای خمشی^۵، دای (۲۰۱۰) با استفاده از نمونه‌های دیسک برزیلی با شکاف مرکزی^۶ و خمش نیم‌دایره‌ای شکاف‌دار^۷ در دستگاه هاپکینسون چقرمگی شکست دینامیکی سنگ گرانیت را تعیین کردند [۸-۱۰].

روش‌های پیشنهادی برای تعیین پارامترهای مقاومتی و چقرمگی شکست مواد سنگی در سال ۲۰۱۲ توسط انجمن بین-المللی مکانیک سنگ (ISRM)^۸ ارائه شد. این انجمن نمونه خمش نیم‌دایره‌ای شکافدار با استفاده از دستگاه هاپکینسون^۹ را به‌عنوان روش پیشنهادی برای آزمون شکست دینامیکی سنگ‌ها پیشنهاد کرد [۱۱].

در این مقاله ابتدا انواع آزمون‌های مورد استفاده برای تعیین چقرمگی شکست دینامیکی و روابط مورد استفاده برای تعیین این پارامتر بیان می‌گردد. سپس نتایج آزمون‌های انجام شده و

در علم مکانیک، به نیروی قابل ملاحظه‌ای که در یک بازه زمانی کوتاه اعمال گردد، ضربه گفته می‌شود. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که دو یا تعداد بیشتری جسم با هم برخورد کنند. چنین نیرویی معمولاً تأثیر بیشتری نسبت به نیروی بزرگتری که در زمان طولانی‌تر اعمال می‌شود، دارد. مواد مختلف در برابر ضربه رفتار کاملاً متفاوتی را نسبت به حالتی که نیروی استاتیکی به آن‌ها اعمال می‌گردد، از خود نشان می‌دهند. در مسائل مهندسی دائماً با نرخ‌های بارگذاری بالا، مواجه هستیم. بعضی از سازه‌ها باید به‌طور مستقیم برای مقاومت در برابر نیروهای حاصل از ضربه‌ها طراحی شوند. از آن جمله است پناهگاه‌ها، انبارهای مهمات، بهمن‌گیرها و سازه‌هایی که برای محافظت پل‌ها در برابر ضربات کشتی‌ها و انفجارهای تصادفی طراحی می‌شوند [۱].

انفجار سنگ، در نتیجه شکست ترد رخ می‌دهد و در این فرآیند تمام ریزترک‌های موجود در یک سنگ همزمان با هم گسترش یافته و باعث آزاد سازی ناگهانی تنش می‌شوند. این پدیده می‌تواند حجم قابل ملاحظه‌ای از سنگ را به‌طور ناگهانی منفجر کند. این آزادسازی انرژی، باعث کاهش انرژی پتانسیل سنگ‌های اطراف منطقه‌ی حفاری شده می‌شود. وجود ترک‌های ذاتی در بسیاری از مواد، همانند سنگ و بتن، شکست مکانیکی در آن‌ها را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تسریع می‌نماید. از آنجا که تمرکز تنش در اطراف ترک‌ها عامل تعیین کننده‌ی در مقاومت توده‌های سنگی و بتنی ترک‌دار محسوب می‌شود، لازم است عوامل ایجاد کننده این تمرکز تنش‌ها و ویژگی‌های آن‌ها مورد بررسی قرار گیرند. چنانچه نمونه‌ای دارای ترک اولیه باشد، معیارهای استحکام و شکست آن تحت بارگذاری‌های مختلف، توسط مباحث مکانیک شکست تعیین می‌شود. مکانیک شکست از جمله مباحث مهم در علوم مهندسی می‌باشد که به بررسی شرایط لازم برای استحکام قطعات ترک‌دار می‌پردازد [۲].

ضریب شدت تنش در یک ماده که دارای ریزترک‌ها با جهت و اندازه معلوم باشد را با علامت K ، که واحد آن $Mpa.m^{1/2}$ است، نشان می‌دهند. هنگامی که ضریب شدت تنش ترک به مقدار بحرانی برسد ترک، شکست آغاز می‌شود. این مقدار بحرانی

⁶Cracked Chevron Notched Brazilian Disc

⁷Notched Semi- Circular Bend

⁸International Society for Rock Mechanics

⁹Split Hopkinson Pressure Bar Test

¹ Fracture Toughness

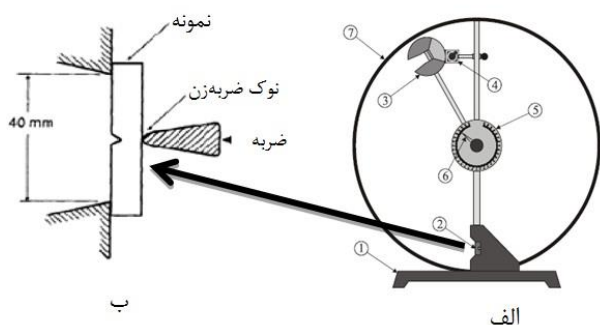
²Drop-Weight Test

³Holed-Cracked Flattened Brazilian Discs

⁴Cracked Straight Through Fattened Brazilian Disc

⁵Notched Semi-Circular Bend

و قابلیت تغییر شکل پلاستیک رادر آن محدود می‌کنند. در شکل ۱-الف یک دستگاه آزمون ضربه چارپی و در شکل ۱-ب نمونه‌ی شکاف‌دار، تکیه‌گاه‌ها و ضربه‌زن به‌طور شماتیک نشان داده شده است. در شکل ۱-الف مشاهده می‌شود دستگاه آزمایش از یک پاندول مدرج تشکیل شده است که هنگام حرکت با نمونه برخورد می‌کند و اختلاف ارتفاع پاندول، انرژی جذب شده توسط نمونه است که معمولاً به شکل انرژی بر واحد سطح تعریف می‌شود. این انرژی را همچنین می‌توان از اختلاف زاویه اولیه و نهایی پاندول محاسبه کرد، این میزان انرژی، معیاری از چقرمگی مواد است [۲۰].



شکل ۱: آزمون ضربه چارپی (الف) دستگاه آزمون ضربه، (ب) نمونه‌ی شکاف‌دار [۲۰].

مطالعات زیادی نشان داده‌اند که آزمون‌های ضربه چارپی معمولی مشکلاتی دارند [۲۱]:

۱. بار دینامیکی در این روش با حرکت فیزیکی چکش شناخته می‌شود. در این حالت، درک درستی از نیروی اینرسی ناشی از انتشار موج تنش در نمونه چارپی حاصل نمی‌گردد. در نتیجه تفسیر نتایج علمی مشکل می‌گردد.
۲. نیروی به‌دست آمده از شمارنده‌های کرنش که بر روی چکش نصب شده‌اند، به‌علت وجود تاثیرات شدید اینرسی، با مقدار نیروی اعمالی بر نمونه متفاوت است. در این صورت ممکن است، نیروی محاسبه شده به‌علت این تاثیر، کمتر محاسبه شود. علاوه بر این، نوسان شدید در مقدار نیروی ثبت شده، تعیین دقیق نیروی بحرانی شکست را مشکل می‌کند.
۳. روش‌های متداول تحلیل داده‌های استاتیکی، برای محاسبه چقرمگی شکست دینامیکی قابل استفاده نیست.

²Charpy Impact Test

عوامل تاثیرگذار بر نتایج این آزمون‌ها مورد بحث قرار گرفته و در ادامه نتایج آزمون‌های انجام شده بر روی نمونه‌های سنگ گرانیت با استفاده از آزمون هایپکینسون مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- آزمون‌های تعیین چقرمگی شکست دینامیکی

در طی سال‌های اخیر مطالعه بر روی مشخصات دینامیکی مواد بصورت قابل ملاحظه افزایش یافته است. بخش قابل ملاحظه‌ای از این مطالعات مربوط به نرخ کرنش بالا ($10^2 - 10^4 s^{-1}$) می‌باشد که با بسیاری از واقعیات مهندسی نظیر عملیات آتشباری و حفاری هم‌خوانی دارد [۱۲]. بطور کلی امروزه روش‌های آزمایشگاهی مختلفی جهت برآورد مشخصات دینامیکی مواد در نرخ کرنش‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله این روش‌های آزمایشگاهی می‌توان به آزمون ضربه-چارپی، آزمون میله بار هایپکینسون و آزمون سقوط وزنه اشاره نمود. ASTM^۱ چندین آزمون استاندارد برای تعیین چقرمگی شکست دینامیکی مواد معرفی کرده است؛ مانند ASTM E399 (برای مواد الاستیک-پلاستیک خطی)، ASTM E813 (برای مواد الاستیک-پلاستیک) و ASTM C 1421-01b (برای سرامیک-ها). همچنین ASTM برای آزمون‌هایی که نرخ بارگذاری آن‌ها کمتر از $10^5 Mpa\sqrt{m}/s$ باشد، آزمون ضربه چارپی را معرفی می‌کند. اگر چه برای نرخ‌های بارگذاری محدوده $Mpa\sqrt{m}/s$ $10^6 - 10^7$ آزمون استاندارد برای تعیین چقرمگی شکست مواد وجود ندارد اما در این میان آزمون میله بار هایپکینسون به دلیل سهولت در انجام آزمون و ارائه نتایج دقیق، بسیار مورد توجه بوده است [۱۳-۱۴].

در ابتدا این دستگاه جهت اعمال بار دینامیکی فشاری مورد استفاده قرار می‌گرفت، با گذشت زمان انواع دیگر بارگذاری‌های دینامیکی نظیر کششی، خمشی، سه‌محوره و پیچشی نیز توسط این دستگاه انجام شد [۱۵-۱۹]. علاوه بر این ASTM استانداردهایی برای آزمون ضربه بصورت وزنه رهاشونده، مانند E 208، E 436 و E 1550 معرفی کرده است.

۲-۱- آزمون ضربه چارپی

آزمون ضربه چارپی^۲ یکی از روش‌های استاندارد برای تعیین انرژی شکست مواد شکننده است. در این آزمون با استفاده از نمونه‌های شکاف‌دار شرایط تنش سه‌بعدی را در نمونه ایجاد کرده

¹ American Society for Testing and Materials

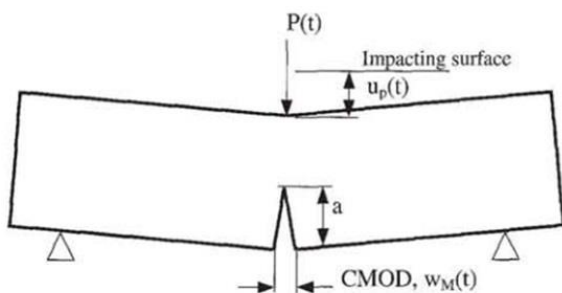
ضریب شدت تنش دینامیکی (K_{Id}) وابسته به زمان شکست (t_f) می‌باشد.

$$K_{Id} = K_I(t_f) \quad (1)$$

پژوهشگران مختلفی با توجه به هندسه و پارامترهای مکانیک شکستگی، روابط مختلفی را جهت محاسبه ضریب شدت تنش دینامیکی ارائه داده‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

۱-۳- محاسبه چقرمگی شکست دینامیکی برای نمونه‌های مکعبی تیرشکل

این محاسبات با پیش فرض‌ها و روش‌های مختلف انجام می‌شود که در ادامه توضیح داده می‌شود. براساس نیروی اعمالی: برای استفاده از این روش، نیروی اعمالی در هر لحظه و فرکانس طبیعی نمونه‌ها باید تعیین شود. رابطه ۲ برای محاسبه چقرمگی شکست دینامیکی با استفاده از این روش به کار می‌رود [۱۹]. برای توضیحات جامع از این روش می‌توان به مرجع ۲۳ مراجعه کرد. در شکل ۷، $u_p(t)$ جابجایی نقطه‌ای بارگذاری و $w_M(t)$ جابجایی بازشدگی دهانه ترک می‌باشد.



شکل ۷: نمایش تغییر شکل نمونه سه نقطه‌ای خمشی تحت نیروی P در وسط تیر [۱۹].

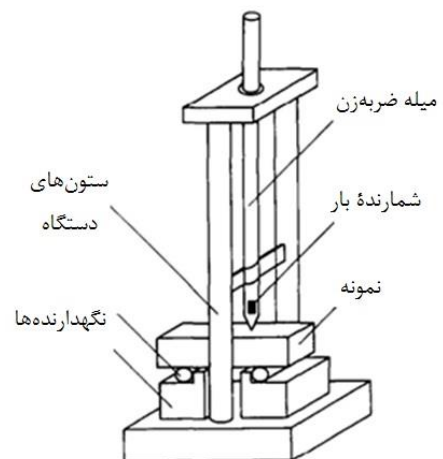
$$\frac{K_I(t)}{K_{IS}} = \frac{\omega_1}{P(t)} \int_0^t P(\tau) \sin \omega_1(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

که در آن ω_1 فرکانس طبیعی نمونه تیرشکل دارای تکیه-گاه، K_{IS} ضریب شدت تنش استاتیکی در نیروی $P(t)$ است و K_{IS} از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

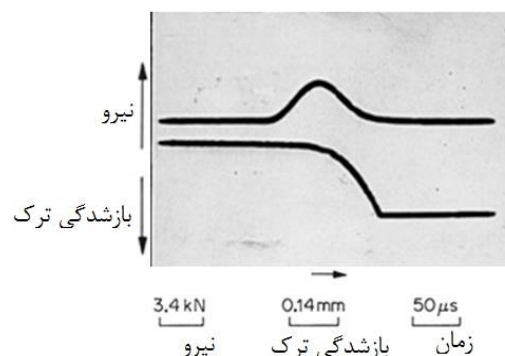
$$K_{IS} = \frac{3 P(t) \beta \sqrt{a}}{2 B \sqrt{W} (1 + 2\alpha)(I - a)^{3/2}} f(\alpha) \quad (3)$$

$$f(\alpha) = (1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2))$$

شده و با سرعت خاصی به نمونه برخورد می‌کند و در اثر ضربه، انرژی مشخصی به نمونه وارد می‌شود. همان‌گونه که از ماهیت این آزمون برداشت می‌گردد می‌توان با تغییر وزن و یا ارتفاع جسم رهاشونده، انرژی‌های متفاوتی را به نمونه مورد آزمایش اعمال نمود (شکل ۵). در این دستگاه نیروی وارده به نمونه (P) و بازشدگی ترک (۷) بطور همزمان اندازه‌گیری می‌شوند [۴].



شکل ۵: تصویر شماتیک از دستگاه آزمون ضربه دارای میله [۴].



شکل ۶: ثبت نیرو - بازشدگی ترک در مقابل زمان [۴].

در آزمون سقوط وزنه، اندازه‌گیری نیروی وارده و بازشدگی ترک، همانند آزمون میله بار هاپکینسون اصلاح شده می‌باشد. در آزمون‌هایی که چنانچه انجام داد، هر دو پارامتر نیرو و بازشدگی پاسخ فرکانسی بیش از ۲۰ KHz دارند. شکل موج به دست آمده از این آزمون‌ها در رایانه ذخیره و آنالیز می‌شود (شکل ۶).

۳- روابط مورد استفاده برای محاسبه چقرمگی شکست دینامیکی

برای محاسبه ضریب شدت تنش دینامیکی، نیروی وارد به نمونه در هر لحظه، تاریخچه ضریب شدت تنش ($K_I(t)$) در طول فرآیند بارگذاری و لحظه‌ای (t_f) که ترک موجود در ماده شروع به رشد می‌کند باید تعیین گردد. رابطه ۱ نشان می‌دهد که

یا کششی ارائه نمودند [۱۱].

$$K_I(t) = \frac{P(t)S}{tR^{1.5}} Y(\alpha_a) \quad (۶)$$

که در آن $K_I(t)$ ضریب شدت تنش دینامیکی در مود I، $Y(\alpha_a)$ تابع بی بعد مربوط به هندسه ترک و نمونه مورد آزمون می باشد. قابل ذکر است که این رابطه زمانی قابل استفاده می شود که نیروی دینامیکی اعمال شده به دو انتهای نمونه با هم برابر باشند. یک نمونه شاخص از این تعادل نیرو قبل از انجام آزمون ها صورت گرفته که در شکل ۸ نشان داده شده است.

۴- نتایج محاسبه چقرمگی شکست دینامیکی

بررسی ها نشان می دهند که ضریب شدت تنش دینامیکی برای شروع رشد ترک می تواند کمتر یا بیشتر از مقدار استاتیکی آن باشد، که وابسته به مود شکست، تاریخچه بارگذاری و مشاهدات آزمایشگاهی است. چونان (۱۹۹۹) نمونه سنگ مرمر با ابعاد $۴۰ * ۴۰ * ۱۸۰$ میلیمتر، عرض شکاف $۰/۲$ میلیمتر، عمق شکاف ۱۵ میلیمتر و دهانه تکیه گاهها ۱۶۰ میلیمتر را با دستگاه وزنه رهاشونده تحت ضربه قرار داد. وی برای تعیین چقرمگی شکست دینامیکی از رابطه ۷ استفاده کرد [۴].

$$K_{Ia} = \frac{P_Q \cdot S}{B \cdot W^{3/2}} * f(a/W) \quad (۷)$$

S: دهانه نگهداری، a: عمق شکاف، B: ضخامت شکاف، W: عرض نمونه، P_Q : نیروی بحرانی شروع رشد ترک $f(a/W)$: فاکتور ضریب تنش که بدون بعد بوده و با نسبت a/W تغییر می کند و طبق رابطه ۸ محاسبه می شود.

α نسبت طول ترک به عرض نمونه، β نسبت فاصله بین تکیه گاهها به عرض نمونه که برابر ۴ در نظر گرفته می شود، جزئیات این فرض در مراجع ۲۴ و ۲۵ تشریح شده است. ω_1 فرکانس طبیعی، ν ضریب پواسون و W عرض نمونه است.

بر اساس جابجایی نقطه‌ی بارگذاری: در این روش از رابطه ۴ برای بدست آوردن چقرمگی شکست دینامیکی استفاده می شود [۱۹].

$$K_I(t) = \frac{3}{2} \frac{\beta}{B\sqrt{W}} \frac{u_p(t)}{C(\alpha)} k_\beta(\alpha) \quad (۴)$$

که در آن $C(\alpha)$ نرمی^۱ نمونه‌ی ترک دار و $k_\beta(\alpha)$ تابع بدون بعدی است که با تغییر α و β تغییر می کند. برای مطالعه‌ی توضیحات بیشتر می توان به مرجع ۲۶ مراجعه کرد. در این روش فرض می شود جابجایی نقطه‌ی بارگذاری برابر با جابجایی انتهای میله است.

بر اساس جابجایی بازشدگی دهانه ترک (CMOD)^۲: در این روش بازشدگی دهانه ترک در طول بارگذاری اندازه گیری شده و ضریب شدت تنش از رابطه ۵ محاسبه می شود.

$$K_I(t) = \frac{E\omega_M(t) k_\beta(\alpha)}{4\sqrt{a\alpha} \nu_\beta(\alpha)} \quad (۵)$$

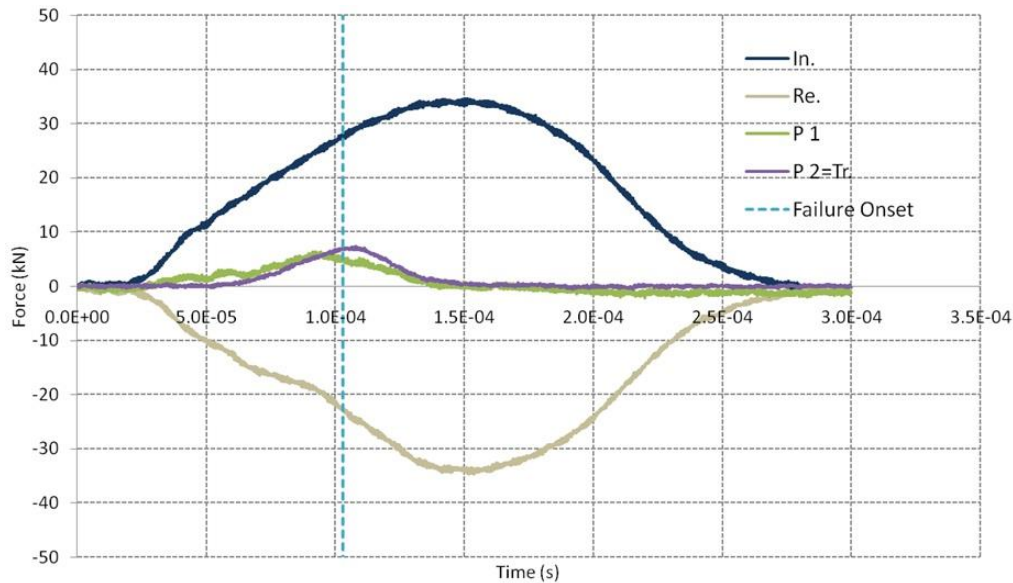
در این گونه مسائل β نسبت فاصله بین تکیه گاهها به عرض مونه برابر ۴ در نظر گرفته می شود. $k_\beta(\alpha)$ و $\nu_\beta(\alpha)$ توابع بدون بعدی هستند که با تغییر α و β تغییر می کنند.

۲-۳- محاسبه چقرمگی شکست دینامیکی برای نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای شکاف دار

ژائو و همکاران رابطه ۶ را برای نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای شکاف دار، جهت تعیین ضریب شدت تنش دینامیکی در مود I

^۱Compliance

^۲Crack Mouth Opening Displacement



شکل ۸: تعادل دینامیکی نیرو. In موج ورودی، Re موج منعکس شده، Tr موج منتقل شده، P₁ نیروی در فصل مشترک میله ورودی و نمونه، P₂ نیرو در فصل مشترک نمونه و میله خروجی [۱۱].

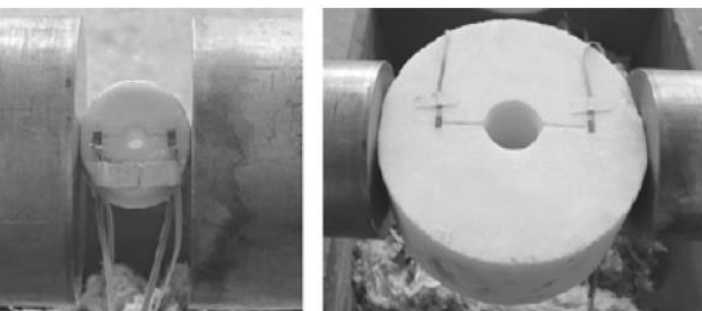
جزئیات این روش در مرجع [۵] بطور کامل بیان شده است.

میانگین چقرمگی دینامیکی نمونه‌ها $2/55 \text{ MPa}\sqrt{m}$ برآورد

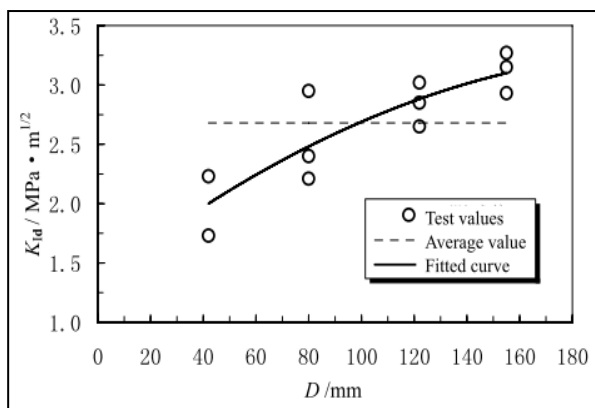
شده است (شکل ۱۰).

$$f(a/w) = \left(\frac{a}{w}\right)^{1/2} \quad (۸)$$

$$\times \left[2.9 - 4.6 \left(\frac{a}{w}\right) + 21.8 \left(\frac{a}{w}\right)^2 - 37.6 \left(\frac{a}{w}\right)^3 + 38.7 \left(\frac{a}{w}\right)^4 \right]$$



شکل ۹: نمونه دیسک برزیلی مسطح سوراخ‌دار و میله ضربه-زن [۵].



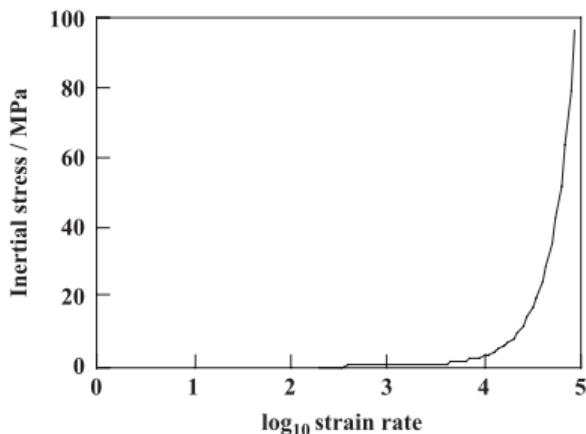
شکل ۱۰: مقادیر چقرمگی دینامیکی سنگ مرمر [۵].

در آزمونی که چونان انجام داد $\frac{a}{w} = 0.375$ نتیجه $B=40$, $S=160 \text{ mm}$, $P_Q=2842 \text{ N}$, $=1.85f(a/w)$ و $W=40 \text{ mm}$ با داشتن مقدار این پارامترها چقرمگی شکست دینامیکی (رابطه ۹) از رابطه ۷ بدست می‌آید.

$$K_{Ia} = 83.1 \text{ N/mm}^{3/2} \quad (۹)$$

وانگ و همکاران (۲۰۰۸) مقادیر چقرمگی دینامیکی سنگ مرمر سفید را با استفاده از نمونه دیسک برزیلی مسطح سوراخ-دار^۱ تعیین نمودند (شکل ۹). آزمون، توسط دستگاه هاپکینسون با قطر ۱۰۰ میلی‌متر انجام شد و شمارنده‌های کرنش بر روی نمونه نصب شدند [۵]. در این روش برای به‌دست آوردن چقرمگی شکست دینامیکی از مفهوم زمان نهفتگی استفاده شده است،

¹Brazilian Discs Holed-cracked Flattened



شکل ۱۱: تنش اینرسی تابعی از نرخ کرنش برای نمونه مس [۲۹].

فاصله‌های کمتر از این مقدار موجب خطاهای توزیع نیرو و فاصله‌های بیشتر از این مقدار خطاهای اینرسی را تولید می‌کنند [۲۸ و ۳۰]. یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار بر چقرمگی شکست دینامیکی، دما می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاثیر دمای بالا بر چقرمگی شکست دینامیکی سنگ کمتر از چقرمگی شکست استاتیکی است [۳۱].

۶- تعیین ضریب شدت تنش دینامیکی مود I با استفاده از نمونه NSCB

آزمون خمش نیم‌دایره‌ای شکاف‌دار^۲ یکی از آزمون‌های پیشنهادی برای تعیین ضریب شدت تنش دینامیکی سنگ-هاست. همان‌طور که قبلاً اشاره شد این آزمون توسط دستگاه میله‌های پکینسون اصلاح شده می‌تواند انجام شود. ابعاد نمونه و روابط مورد استفاده برای این آزمون در بخش‌های قبلی توضیح (بخش ۳-۲) داده شده است.

پنج نمونه از سنگ گرانیت سازند لارنشین کشور کانادا برای انجام این آزمون‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات مکانیکی این سنگ‌ها در جدول ۱ آمده است.

۵- عوامل موثر بر چقرمگی شکست دینامیکی سنگ‌ها

عوامل متعددی بر آزمون‌های تعیین چقرمگی شکست دینامیکی تاثیرگذار هستند. مهمترین عوامل دخیل در این آزمون‌ها عبارتند از: نرخ بارگذاری، انرژی، دما و تاثیرات اینرسی. یکی از عوامل قابل ملاحظه در بررسی پارامترهای مکانیک شکست مواد، نرخ بارگذاری می‌باشد. خواص مکانیکی برخی مواد (مقاومت نهایی، مدول ینگ، انرژی شکست) به شدت به نرخ بارگذاری وابسته می‌باشد. به‌طور کلی با افزایش نرخ بارگذاری، مقاومت دینامیکی مواد افزایش یافته و چقرمگی شکست دینامیکی نیز با افزایش نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد [۲۷]. در این آزمون‌ها شتاب ضربه‌زننده را می‌توان با استفاده از شتاب‌سنج‌های گوناگون اندازه‌گیری کرد. این شتاب‌سنج‌ها پاسخ عمودی انتشار موج تنش را اندازه‌گیری می‌کنند. بعد از ایجاد ضربه، موجی در درون نمونه و ضربه‌زننده ایجاد می‌شود. با بررسی این موج می‌توان به بسیاری از خواص ماده پی برد. این اندازه‌گیری‌های کرنش برای تعیین تاریخچه تنش، کرنش و نرخ کرنش مورد استفاده قرار می‌گیرند. کلیدی‌ترین پارامتری که اثرگذاری ضربه به آن وابسته است، انرژی ضربه می‌باشد. به‌طوری که ضربه با انرژی بالاتر، خرابی بیشتری به بار می‌آورد و در حقیقت انرژی ضربه با افزایش سرعت ضربه، افزایش می‌یابد. معمول‌ترین روش برای تعیین تاریخچه بارگذاری در طول آزمون‌های ضربه، قرار دادن شمارنده کرنش بر روی ضربه‌زن می‌باشد. در نتیجه ضربه‌زن تبدیل به نیروسنج می‌شود. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهند که خطاهای اینرسی به‌وجود آمده از ضربه با دور کردن کرنش‌سنج از سطح تماس، بطور چشمگیری افزایش می‌یابد که دلیل این امر افزایش جرم بین سطح تماس و کرنش‌سنج می‌باشد [۲۸]. همچنین تغییرات نیروی اینرسی در نرخ کرنش‌های بالا، به شدت افزایش می‌یابد (شکل ۱۱) [۲۹].

مانهان^۱ (۲۰۰۷) در نتایج مطالعات خود دریافت که یک فاصلهٔ بهینه برای کرنش‌سنج از سطح برخورد میله وجود دارد که حدود ۷/۴ میلی‌متر است.

^۲Notched Semi- Circular Bend

^۱Manahan

جدول ۱: میانگین مشخصات مکانیکی سنگ‌های مورد استفاده برای آزمون

مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)	نسبت پوکی	تخلخل (%)	چگالی (g/c m ³)
۲۵۹	۱۲/۸	۰/۲۱	۹۲	۰/۰۰۰۶	۰/۶۴	۲/۶۳

جدول ۲: ابعاد نمونه‌ها و فشار اعمالی تفنگ گاز

نمونه - ها	فشار تفنگ گاز (psi)	R (mm)	t (mm)	a (mm)	فاصله تکیه - گاه ها (mm)	$\alpha_a = a/R$	$\alpha_t = t/R$	$\alpha_s = S/2R$	$Y(\alpha_a)$
۱	۵	۱۸/۳۷	۱۸/۴	۴/۱۶	۲۲/۱	۰/۲۲۶	۱/۰۰۱	۰/۶۰۱	۱/۱۲۹
۲	۶	۱۸/۲۲	۱۶/۷۹	۴/۳۷	۲۲/۱	۰/۲۳۹	۰/۹۲۱	۰/۶۰۶	۱/۱۶۶
۳	۱۰	۱۸/۲۵	۱۷/۱۴	۴/۲۷	۲۲/۱	۰/۲۳۳	۰/۹۳۹	۰/۶۰۵	۱/۱۵
۴	۱۲	۱۸/۲۴	۱۸/۵۲	۳/۵۴	۲۲/۱	۰/۱۹۴	۱/۰۱۵	۰/۶۰۵	۱/۰۴۴
۵	۱۴	۱۸/۱۷	۱۷/۰۷	۴/۰۲	۲۲/۱	۰/۲۲۱	۰/۹۳۹	۰/۶۰۸	۱/۱۱۵



ب



الف

شکل ۱۳: تصویر نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون

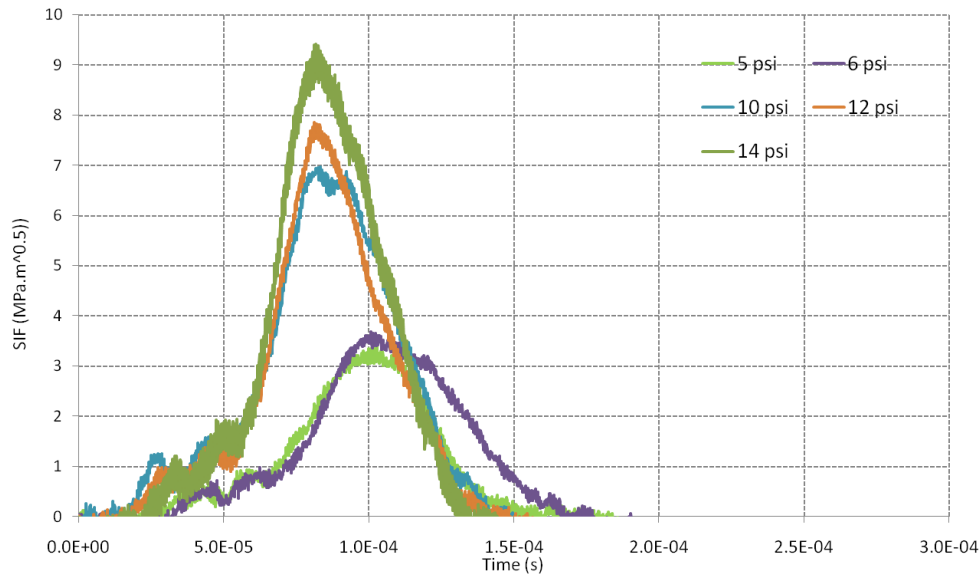
با استفاده از نتایج آزمون‌ها (محاسبه شده با رابطه ۶) تغییرات ضریب شدت تنش دینامیکی با زمان برای پنج نمونه مورد آزمون در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

در این مطالعه، آزمون‌ها با استفاده از دستگاه هایپکینسون اصلاح شده موجود در دانشگاه تورنتو توسط مولفین مقاله انجام شده است. در شکل ۱۲ تصویر قرارگیری نمونه بین میله ورودی و خروجی دستگاه هایپکینسون نشان داده شده است.



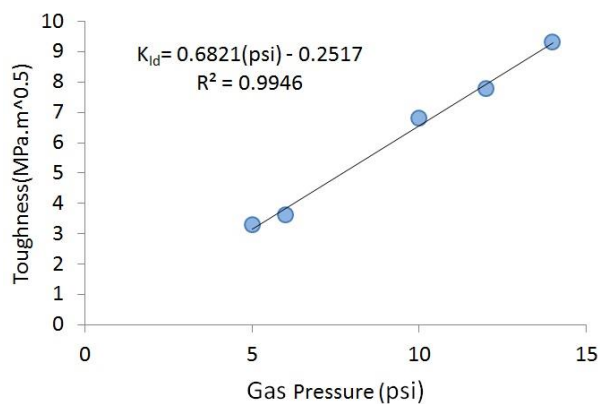
شکل ۱۲: تصویر قرار گرفتن نمونه بین میله‌های ورودی و خروجی

مشخصات ابعاد نمونه‌ها و فشار اعمالی توسط تفنگ گاز به‌طور خلاصه در جدول ۲ آمده است. قبل و بعد از انجام آزمون‌ها، از نمونه‌ها عکس گرفته شده است (شکل ۱۳).



شکل ۱۴: تاریخچه ضریب شدت تنش دینامیکی برای پنج نمونه مورد آزمایش

افزایش نرخ بارگذاری، چقرمگی شکست دینامیکی افزایش می‌یابد. نرخ ضریب شدت تنش دینامیکی نیز همانند چقرمگی شکست دینامیکی با افزایش فشار گاز افزایش می‌یابد (شکل ۱۶).



شکل ۱۵: رابطه چقرمگی دینامیکی با فشار تفنگ گاز برای پنج آزمون انجام گرفته.

شکل ۱۷ رابطه چقرمگی با نرخ ضریب شدت تنش را نشان می‌دهد. از این نمودار نتیجه می‌شود که وقتی نمونه در معرض نرخ ضریب شدت تنش دینامیکی بالاتر قرار گیرد، چقرمگی شکست دینامیکی افزایش می‌یابد.

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود ضریب شدت تنش دینامیکی و چقرمگی با افزایش فشار تفنگ گاز، افزایش می‌یابند. چقرمگی شکست دینامیکی سنگ وابسته به نرخ بارگذاری است. نرخ بارگذاری از شیب نمودار قبل ماکزیمم تاریخچه ضریب شدت تنش دینامیکی، به دست می‌آید.

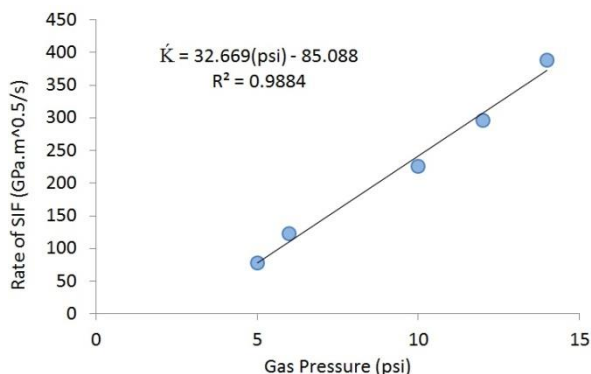
در جدول ۳ مقادیر نرخ ضریب شدت تنش دینامیکی و چقرمگی شکست دینامیکی برای همه نمونه‌های مورد آزمایش محاسبه شده است.

جدول ۳: پارامترهای دینامیکی محاسبه شده برای نمونه‌ها

نمونه-ها	فشار تفنگ گاز (PSI)	نرخ ضریب شدت تنش دینامیکی (GPa.m ^{0.5} /s)	چقرمگی دینامیکی (MPa.m ^{0.5})
۱	۵	۷۸	۳/۳
۲	۶	۱۲۲	۳/۶
۳	۱۰	۲۲۵	۶/۸
۴	۱۲	۲۹۷	۷/۸
۵	۱۴	۳۸۸	۹/۳

در شکل ۱۵ رابطه بین نرخ بارگذاری و چقرمگی شکست دینامیکی نشان داده شده است، همانطور که مشاهده می‌شود با

تنش با رابطه خطی $\dot{K} = 32.669(\text{psi}) - 85.088K$ = افزایش می-
یابند. چقرمگی شکست دینامیکی با افزایش نرخ ضریب شدت
تنش، طبق رابطه
 $K_{Id} = 0.0206 * \dot{K} + 1.5968$ از این نمودار
نتیجه می شود که وقتی نمونه در معرض نرخ ضریب شدت تنش
دینامیکی بالاتر قرار گیرد، چقرمگی شکست دینامیکی افزایش
می یابد. همه این نتایج نشان می دهد که چقرمگی شکست
دینامیکی در سنگ ها وابسته به نرخ بارگذاری است.



شکل ۱۶: رابطه نرخ ضریب شدت تنش دینامیکی با فشار تفنگ گاز برای پنج آزمون انجام شده.

منابع

[1] Barpi, F., (2004) "Impact behaviour of concrete: a computational approach", Journal of Engineering Fracture Mechanics, Vol 71, PP 2197-2213.

[۲] آیت الهی، مجیدرضا و باقری فرد، سارا. (۱۳۸۳) "چقرمگی شکست مواد سنگی و سرامیکی تحت بارگذاری مرکب- بررسی نمونه های آزمایشی"، کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

[3] Zeinoddinia, M., Parkeb, G.A.R., Harding, J.E., (2002) "Axially pre-loaded steel tubes subjected to lateral impacts: an experimental study", International Journal of Impact Engineering, Vol 27, PP 669-690.

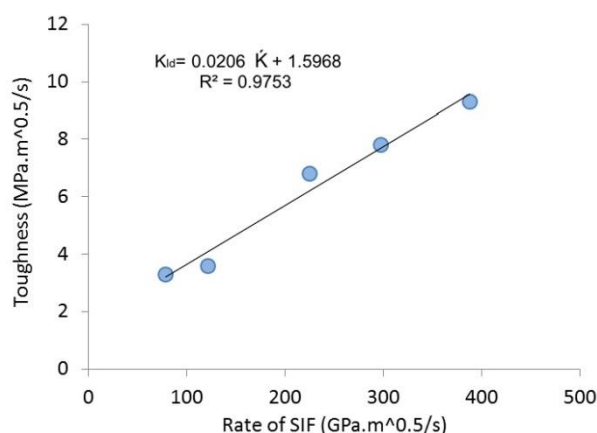
[4] Tang chunan and xuxiaohe, (1990) "A new method for measuring dynamic fracture toughness of rock" Engineering fracture mechanics vol.35, no.4/s, pp. 783-791.

[5] Wang. Q. Z., Zhang. S., Xie. H. P., (2008) "Rock Dynamic Fracture Toughness Tested with Holed-cracked Flattened Brazilian Discs". Proceedings of the XIth International Congress and Exposition, Orlando, Florida USA.

[6] Wang. Q.Z., Feng, F., Ni, M., Gou. X.P., (2011) "Measurement of mode I and mode II rock dynamic fracture toughness with cracked straight through flattened Brazilian disc impacted by split Hopkinson pressure bar", Engineering Fracture Mechanics 78 - 2455-2469.

[7] Nikita. F. Morozov., Yuri. V. Petrov., Vladimir. I. Smirnov., (2009) "Dynamic Fracture of Rocks", 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference, Lisbon, Portugal, 7-11.

[8] Chen. R., Xia. K., Dai. F., Lu. F., Luo. S.N., (2009) "Determination of dynamic fracture parameters using a semi-circular bend technique in split Hopkinson pressure bar testing", Engineering Fracture Mechanics 76 - 1268-1276.



شکل ۱۷: رابطه چقرمگی در برابر نرخ ضریب شدت تنش برای پنج آزمون انجام شده.

۷- نتیجه گیری

در مسائل مهندسی دائماً با نرخ های بارگذاری بالا مواجه هستیم، به همین دلیل بعضی از سازه ها باید به طور مستقیم برای مقاومت در برابر نیروهای حاصل از ضربه ها طراحی شوند. با توجه به فعالیت های مهندسی سنگ نظیر حفاری، استخراج، انفجار و جداسازی مواد معدنی که در معادن انجام می گیرد، به کارگیری اصول و روش های مکانیک شکست دینامیکی سنگ ضروری است.

با استفاده از دستگاه هاپکینسون آزمون های دینامیکی با نمونه های نیم دایره ای شکاف دار بر روی نمونه هایی از سنگ گرانیت انجام گرفت و چقرمگی شکست دینامیکی در نرخ های بارگذاری مختلف به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون ها، با افزایش نرخ بارگذاری، چقرمگی شکست دینامیکی با رابطه خطی $K_{Id} = 0.6821(\text{psi}) - 0.2517K$ و نرخ ضریب شدت

- impact tests on tantalum”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol 561, PP 624–1650.
- [21] Feng Dai, (2010)“ Dynamic Tensile, Flexural and Fracture Tests of Anisotropic Barre Granite”, thesis requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto.
- [22] Grote, D.L., Park, M.Zhou.(2001)“Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol 25, PP 869–886.
- [23] kishimoto. K., Aoki. S., Sakata. M.,(1980) “Simple formulation for Dynamic stress intensity factor of pre-cracked charpy specimen”, *Engineering Fracture Mechanics*, Pergamon press Ltd, Vol. 13, pp. 501-508.
- [24] Tada, H., Paris, P., Irwin, G.,(1985)“The Stress Analysis of Cracks Handbook”, 2nd edition, Paris Productions, Inc., St Louis.
- [25] Rubio, L., Fernandez-Saez J., Navarro. c. (1998), "Factor de Intensidad de Tensiones Dinamico en Pro betas de Flexion en Tres Puntos y de Flexion en un Punto Sometidas a Pulsos de Carga de Corta Duracion," *Anales de Mecanica de la Fractura*, 15, 97-101.
- [26] Guinea, G., Pastor, I., Planas, I., Elices. M.,(1998) "Stress Intensity Factor Compliance and CMOD for a General Three-point Bend Beam", *Int. J. Fracture*, 89 (3), 103-116.
- [27] Behnera, T., Orphalb, D.L., Hohlera, V., Anderson, C.E., Masonc, D.W. (2006)“Templetond Hypervelocity penetration of gold rods into SiC-N for impact, velocities from 2.0 to 6.2 km/s”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol 33, PP 68–79.
- [28] Manahan. Sr. M. P., and Stonesifer R. B.,(2007)“studies toward optimum instrumented striker designs”, *European Structural Integrity Society*.
- [29] Field. J.E., Walley. S.M., Proud. W.G., Goldrein. H.T., Siviour. C.R.,(2004) “Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies”*International Journal of Impact Engineering* 30 - 725–775.
- [30] Enrico Lucon, (2008) “The Influence of Instrumented Striker Configuration on the Results of Dynamic Toughness Testing”, *SCK•CEN Boeretang 200 BE-2400 Mol Belgium* September.
- [31] Zhang ZX, Yu. J., Kou. S.Q., Lindqvist. P.-A. (2001)“Effects of high temperatures on dynamic rock fracture” *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38 - 211–225.
- [9] Dai. F., Chen. R., Iqbal. M.J., Xia. K.,(2010) “Dynamic cracked chevron notched Brazilian disc method for measuring rock fracture parameters” *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 47 - 606–613.
- [10] Dai. F., Xia. K., Zheng. H., Wang. Y.X., (2011)“Determination of dynamic rock Mode-I fracture parameters using cracked chevron notched semi-circular bend specimen”, *Engineering Fracture Mechanics* 78 - 2633–2644.
- [11] Zhou. Y.X., Xia. K., Li. X.B., Li. H.B., Ma. G.W., Zhao. J., Zhou. Z.L., Dai. F.,(2012) “Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials” *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 49 105–112.,
- [12] Naghdabadi. R., Ashrafi. M.J, Arghavani. J.,(2010) “Experimental and Numerical Investigation of Pulse-shaped Split Hopkinson Pressure Bar Test”, *Materials Science & Engineering*, doi:10.1016/j.msea.2012.01.095.
- [13] Hernandez. C., Maranon. A., Ashcroft. I.A., Casas-Rodriguez. J.P.,(2011) “An inverse problem for the characterization of dynamic material model parameters from a single SHPB test”, *Procedia Engineering* 10 1603–1608.
- [14] Chen. W. W., Song. B., (2011) “Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and applications”, Springer.
- [15] Gilat. A., Cheng. C. S., (2002)“Modeling torsional split Hopkinson bar tests at strain rates above 10,000 s⁻¹” *International Journal of Plasticity* 18 787–799.
- [16] Fellows. N.A., Harding. J., (2001) “Use of high-speed photography to study localisation during high-strain-rate torsion testing of soft iron”, *Materials Science and Engineering A* 298 90–99.
- [17] Gary. G. and Bailly. P., (1998)“Behaviour of quasi-brittle material at high strain rate. Experiment and modeling” *Eur. J. Mech., A/Solids*, 17, no 3, 403-420.
- [18] Frew. D. J., Akers. S. A., Chen. W., and Green. M. L., (2010)“Development of a dynamic triaxial Kolsky bar”, *Meas. Sci. Technol.* 21 105704.
- [19] Rubio. L., Fernandez-Saez. J., Navarro. C.,(2006),”Determination of Dynamic Fracture initiation Toughness using Three-point Bending Tests in a Modified Hopkinson Pressure Bar.”, *Experimental Mechanics*,.
- [20] Czarnotaa, C., Jacquesb, N., Merciera, S., Molinaria A.,(2008) “Modelling of dynamic ductile fracture and application to the simulation of plate

Methods for determining dynamic fracture toughness testing of rock with emphasis on Split Hopkinson Pressure Bar

A. Mirmohammadlou^a, H. Memarian^{*b}, M. Jafari^c, Sh.Zandyavari^d, Z. Shahmorad^e

^aMSc student of Rock Mechanics Engineering, University of Tehran, Iran

^bProfessor of Geo-Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran, Memarian@ut.ac.ir

^cPhD student of Civil Engineering, University of Toronto, Canada

^dBSc student of Mining Engineering, University of Tehran, Iran

^eBSc student of Mining Engineering, University of Tehran, Iran

Abstract

Rapid development of engineering activities expands variety of rock engineering processes such as drilling, blasting, mining and mineral separating. These activities lead to employment of rock dynamic fracture mechanics methods. Drilling operations and rock cutting processes normally follow with crack growth mechanism in rock mass. Fracture mechanics properties of rock play an important role in crack growth behavior in fractured layers and rock masses. Explosion, being used in mines to break rocks and excavate underground spaces, makes mine one of the most dangerous workplaces. Fall or throw of rocks are frequent in the mining environments and by increasing excavation depths, rock explosion phenomenon might occurs. The behavior of rocks under different loading conditions and the nature of fractures propagation in rocks can accelerate these phenomenon and increase costs. In order to ensure safety against dynamic forces, knowing the breaking mechanisms and effective factors of failure are essential. This paper attempt to present dynamic fracturing of rocks and its effective parameters, experiments are used to determine the parameters of dynamic fracture, required equations to compute them and effect of loading rate on the dynamic fracture toughness. This followed by experiments with Split Hopkinson Pressure Bar apparatus and the results of tests are examined to determine the dynamic fracture toughness of rocks.

Key Word:

Dynamic fracture toughness, dynamic fracture toughness testing, Split Hopkinson Pressure Bar, loading rate, rock dynamic fracture toughness.